Antworten zur Zielkontrolle

Antworten zu Kapitel 2.1

1. Erhaltungsgrößen sind die Masse, der Impuls in x-, y- und z-Richtung und die Energie.
2. Die Unterschiede zwischen Integral- und Differentialform sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.
3. Die Massenerhaltungsgleichung wird an einem raumfesten Volumenelement hergeleitet. Die Summe aller Massenströme durch die sechs Oberflächen ist gleich der zeitlichen Änderung der Masse im Volumenelement.
4. Die Impulserhaltungsgleichungen werden aus dem zweiten Gesetz von Newton hergeleitet.
5. Die Energieerhaltungsgleichung wird aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik hergeleitet.
6. Die vektorielle Form der Navier-Stokes-Gleichungen ist als Gleichung 2.18 angegeben.
7. Zusätzliche Gleichungen sind die thermische und die kalorischen Zustandsgleichungen und neun Beziehungen für die Spannungen, wie z. B. die Stokesschen Beziehungen.
8. Physikalische Randbedingungen müssen vom Benutzer vorgegeben werden, numerische Randbedingungen werden vom Programm berechnet.
9. Am Unterschall-Zuströmrand müssen vier physikalische Randbedingungen vorgegeben werden, an einem Überschall-Abströmrand keine (in 3D).
10. Die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen lösen die Turbulenzen auf und benötigen deshalb ein extrem feines Rechennetz. Die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen verwenden Turbulenzmodelle und benötigen nicht so feine Rechennetze, weshalb die Rechenzeiten deutlich kürzer sind.
11. Turbulenzmodelle sind notwendig, um die hochfrequenten turbulenten Schwankungen, die vom Rechennetz nicht aufgelöst werden, berechnen zu können.
12. Bei den Thin-Layer Navier-Stokes-Gleichungen werden die Reibungs- und Wärmeleitungsterme in die beiden Richtungen parallel zur Wand vernachlässigt.
13. Bei den Euler-Gleichungen werden alle Reibungs- und Wärmeleitungsterme vernachlässigt. Sie gelten deshalb nur für hohe Reynoldszahlen und ablösefreie Strömungen.
14. Bei der Potentialgleichung werden alle Reibungs- und Wärmeleitungsterme wie bei den Euler-Gleichungen vernachlässigt und Verluste werden nicht zugelassen (Rotationsfreiheit bzw. isentrope und isenthalpe Strömung).
15. Die Polare kann nur mit den Navier-Stokes-Gleichungen berechnet werden, da bei größeren Anstellwinkeln die Strömung ablösen kann.
16. Um die Stoßlage um ein Hyperschallflugzeug abschätzen zu können, würden die Euler-Gleichungen ausreichen.

Antworten zu Kapitel 3.1

1. Diskretisierung bedeutet die Umwandlung der Differentiale in finite Differenzen.

2. Diskretisierungsmethoden sind die Finite-Elemente-Methode, die Finite-Volumen-Methode und die Finite-Differenzen-Methode.
3. Die räumlichen Ableitungen können durch Vorwärtsdifferenzen, Rückwärtsdifferenzen oder zentrale Differenzen diskretisiert werden.
4. Die Genauigkeitsordnung ist die Größenordnung des Abbruchfehlers. Bei einer Genauigkeit 1. Ordnung ist der Abbruchfehler z. B. $O(\Delta x)$, bei 2. Ordnung $O(\Delta x^2)$.
5. Bei stetigem Verlauf der Strömungsgröße sollte die Genauigkeit 2. Ordnung sein, bei unstetigem Verlauf nur 1. Ordnung um Oszillationen an der Unstetigkeitsstelle zu vermeiden.
6. Die zeitliche Ableitung kann durch eine Vorwärtsdifferenz oder eine zentrale Differenz diskretisiert werden.
7. Bei der zeitasymptotischen Rechnung wird eine stationäre Lösung gesucht und die zeitliche Ableitung wird lediglich aus numerischen Gründen verwendet. Bei der zeitgenauen Rechnung wird die instationäre Lösung gesucht und die zeitliche Ableitung wird physikalisch aufgelöst.
8. Für die instationäre Rechnung wird eine zentrale Differenz verwendet, da diese eine Genauigkeit von 2. Ordnung hat.
9. Für stationäre Lösungen werden die zeitlichen Ableitungen mitgelöst, da dann die Erhaltungsgleichungen hyperbolisch bleiben und mit einem Lösungsverfahren gelöst werden können.
10. Nach der Diskretisierung erhält man die so genannten Differenzengleichungen.
11. Die Differenzengleichung ist konsistent mit der Differentialgleichung, wenn für Netzmaschenweiten, die gegen Null gehen, die Abbruchfehler auch gegen Null gehen, d. h. die Differenzengleichungen stimmen mit den Differentialgleichungen überein.
12. Ein numerisches Lösungsverfahren ist stabil, wenn die Abbruchfehler während des Rechenlaufs immer kleiner werden. Die numerische Lösung erfüllt dann die Differenzengleichung.
13. Eine numerische Lösung ist konvergent, wenn sie die Differentialgleichungen erfüllt. Das Residuum als Maß für die Erfüllung der Erhaltungsgleichungen muss immer kleiner werden. Sind die Residuen aller Erhaltungsgleichungen kleiner als 10^{-4}, so spricht man in der Regel von einer konvergenten Lösung.
14. Eine additive numerische Viskosität wird bei der zentralen räumlichen Diskretisierung benötigt, um die Abbruchfehler zu dämpfen, das Verfahren stabil zu machen und Oszillationen an Unstetigkeitsstellen zu reduzieren.
15. Upwind-Diskretisierung bedeutet eine einseitige Diskretisierung, die die Ausbreitungsrichtung von Informationen berücksichtigt.
16. Bei der expliziten Diskretisierung werden die Flussterme zum bekannten Zeitpunkt n gebildet, während sie bei der impliziten Diskretisierung zum Zeitpunkt $n+1$ gebildet werden.
17. Vorteil der impliziten Diskretisierung ist, dass größere CFL-Zahlen bzw. Zeitschritte verwendet werden können. Hierdurch sind die Gesamtrechenzeiten üblicherweise kürzer als bei expliziten Verfahren. Nachteil ist die aufwändigere Programmierung, da ein Gleichungssystem gelöst bzw. eine Matrix invertiert werden muss.
18. Die CFL-Zahl (Courant-Friedrichs-Levy-Zahl) koppelt den Zeitschritt Δt an die Maschenweite Δx, siehe Gleichung 3.31.
19. Bei einem rein expliziten Verfahren kann die maximale CFL-Zahl höchstens 1 sein.

Antworten zu Kapitel 4.1

1. Ein gutes Rechennetz soll möglichst rechtwinklig sein mit Änderungsraten kleiner als 1,2. Dann sind die Abbruchfehler am kleinsten und die Genauigkeit am größten (sieh auch Kapitel 6.4).
2. Bei schiefwinkligen Rechennetzen passen sich die Netzlinien der Wandkontur an, wodurch die Genauigkeit der Lösung am Rand steigt.
3. O-, C-, und H-Netze sind schiefwinklige Rechennetze. Die Buchstaben geben die Form der Netzlinien an, siehe Kapitel 4.3.2. O-Netze lösen die Grenzschicht an der Geometrie gut auf, allerdings nicht den Nachlauf. C- und H-Netze lösen Grenzschicht und Nachlauf gut auf. H-Netze verschwenden allerdings Netzpunkte in der Zuströmung.
4. Rechennetze werden am Festkörperrand verdichtet, um die Strömungsgradienten in der Wandgrenzschicht auflösen zu können und die Genauigkeit zu erhöhen. Bei reibungsfreier Rechnung ist dies nicht notwendig, so dass am Festkörperrand die Rechennetze deutlich gröber sein können, was Rechenzeit spart.
5. Der Vorteil blockstrukturierter Rechennetze ist, dass sie aus mehreren Blöcken zusammengesetzt werden können. Hierdurch lassen sich auch für komplexere Geometrien gute Rechennetze mit geringer Schiefwinkligkeit erzeugen.
6. Adaptive Rechennetze passen ihre Maschenweite automatisch den Strömungsgradienten an. Somit können z. B. Verdichtungsstöße gut aufgelöst werden, während im restlichen Strömungsfeld unnötige Netzpunkte vermieden werden. Die Rechnungen können somit genau und effizient durchgeführt werden.
7. Unstrukturierte Rechennetze sind sehr flexibel und lassen sich auch an komplexe und zusammengesetzte Geometrien gut anpassen.
8. Eine ideale Netzzelle soll am besten rechtwinklig sein, da dann die Abbruchfehler klein sind und die Genauigkeit groß.

Antworten zu Kapitel 5.1

1. Die drei Klassen von Lösungsverfahren sind zentrale Verfahren, Upwind-Verfahren und High-Resolution-Verfahren.
2. Zentrale Verfahren sind genau, haben aber Probleme an Unstetigkeitsstellen wie Verdichtungsstößen. Die Lösung oszilliert dort meistens. Upwind-Verfahren sind sehr robust und oszillationsfrei, allerdings nicht genau genug. High-Resolution-Verfahren kombinieren beides. Sie sind genau und verhindern die Entstehung von Oszillationen an Unstetigkeitsstellen.
3. Zu den zentralen Lösungsverfahren zählen die Lax-Wendroff-Verfahren, die Runge-Kutta-Verfahren und die ADI-Verfahren.
4. Ein Vorteil der Upwind-Verfahren ist ihre Robustheit, auch bei Hyperschallströmungen mit starken Verdichtungsstößen. Nachteilig ist, dass sie nur eine Genauigkeit 1. Ordnung haben und somit bei stetigem Strömungsverlauf zu ungenau sind.
5. Monotone Lösungsverfahren verhindern die Entstehung von Extremstellen. Hierdurch können Oszillationen und unphysikalische Lösungen erst gar nicht entstehen.
6. Verfahren, die eine räumliche Genauigkeit von 2. Ordnung haben, sind nicht mehr streng monoton, da dies nur Verfahren 1. Ordnung erfüllen.

7. Für Verfahren 2. Ordnung wurde deshalb die TVD-Bedingung eingeführt, eine abgeschwächte Monotonie-Bedingung. Sie verhindert bei Verfahren von 2. Ordnung Genauigkeit die Entstehung von Oszillationen. Allerdings schließt sie unphysikalische Lösungen nicht aus.
8. Deshalb muss bei Verfahren mit einer räumlichen Genauigkeit von 2. Ordnung neben der TVD-Bedingung auch die Entropie-Bedingung erfüllt sein. Sie erlaubt nur Lösungen, bei denen die Gesamtentropie zunimmt.
9. Limiter-Funktionen begrenzen die Steigungen der Zellgrößen an Unstetigkeitsstellen. Hierdurch wird an Unstetigkeitsstellen die räumliche Genauigkeit auf 1. Ordnung reduziert und Oszillationen werden verhindert.
10. High-Resolution-Verfahren bzw. TVD-Verfahren liefern sowohl bei stetigem, als auch bei unstetigem Strömungsverlauf genaue und oszillationsfreie Lösungen.

Antworten zu Kapitel 6.1

1. Bei einer numerischen Strömungsberechnung müssen folgende fünf Schritte durchgeführt werden: Erzeugung des Rechengebiets, Erzeugung des Rechennetzes, Vorbereitung der Strömungsberechnung (Pre-Processing), Strömungsberechnung und Auswertung (Post-Processing).
2. Die Geometrie kann üblicherweise als CAD-Datei oder als Textdatei mit den Koordinaten eingelesen werden. Moderne CFD-Programme haben auch Programmteile, mit denen die Geometrie direkt erzeugt werden kann.
3. Das Rechengebiet begrenzen folgende Randarten: Zuströmränder, Abströmränder, periodische Ränder und Symmetrieebenen. Durch sie kann das Fluid strömen. Nicht durchströmte Ränder sind die Festkörperränder, die durch die Geometrie selbst gebildet werden.
4. Symmetrieebenen helfen Rechenzeit zu sparen, da das Rechengebiet deutlich verkleinert werden kann, wodurch Netzpunkte und Rechenzeit eingespart werden können.
5. Üblicherweise sollen die Ränder des Rechengebiets drei charakteristische Geometrielängen wie z. B. die Sehnenlänge beim Tragflügelprofil von der Geometrie selbst entfernt sein, um die Strömung an der Geometrie nicht zu verfälschen, da am Rand oftmals konstante Werte vorgeschrieben werden.
6. Das Rechennetz soll in Gebieten mit starken Gradienten verdichtet werden, um eine bessere Auflösung und Genauigkeit erzielen zu können. Dies ist bei starken Krümmungen und Knicken der Fall, in der Grenzschicht und an Unstetigkeitsstellen wie Verdichtungsstößen.
7. Eine Netzverfeinerungsstrategie ist sinnvoll, um schneller eine konvergente Lösung zu erhalten. Die Rechnung wird auf einem groben Netz gestartet. Nach einigen Iterationen wird die Lösung auf ein feineres Netz interpoliert. Auf diesem feinen Netz werden wieder einige Rechenschritte durchgeführt, bevor wieder auf das nächst feinere Netz interpoliert wird. Hierdurch werden die höherfrequenten Störungen schneller eliminiert.
8. Bei einer Netzunabhängigkeitsstudie werden Rechnungen auf unterschiedlich feinen Netzen durchgeführt und ihre Lösungen werden miteinander verglichen. Ziel ist es, das Netz mit der kleinsten Netzpunktzahl zu finden, bei dem die Lösung nahezu keine Unterschiede zum feinsten Netz aufweist.

9. Beim Pre-Processing wird die Strömungsberechnung vorbereitet und es werden alle notwendigen Parameter und die Randbedingungen definiert.
10. Es sollte die ähnlichste vorhandene Lösung als Startlösung verwendet werden um, da dann die Rechnung am schnellsten konvergiert.
11. Die Strömung kann am besten mittels Geschwindigkeitsvektoren oder Stromlinien sichtbar gemacht werden.
12. Validierung bedeutet den Vergleich einer numerischen Lösung mit theoretischen oder experimentellen Ergebnissen um sicherzustellen, dass das Rechenprogramm zuverlässige Ergebnisse liefert.
13. Wenn CFD-Programme für neuartige Anwendungen verwendet werden, sollte zuerst eine Validierung durchgeführt werden.
14. Im Bereich von 0° bis 12° stimmen Rechnung und Messung in Bild 6.5 gut überein. In diesem Bereich kann das CFD-Programm mit guter Genauigkeit eingesetzt werden.
15. Die Berechnung größerer Ablösegebiete ist schwierig, weil die Strömung instationär wird und die Turbulenzmodelle oftmals zu ungenau sind.